

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210872

考虑新能源消纳的电采暖集群多功率级控制策略研究

杨玉龙¹, 王甜甜¹, 陈祥², 金荣¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012;

2. 国网安徽省电力有限公司阜阳供电公司, 安徽 阜阳 236000)

摘要: 目前, 电采暖设备作为新能源消纳的有效途径存在源荷匹配性低、档位优化不足的问题。针对上述问题, 提出一种基于电采暖设备集群控制架构的多功率级控制策略。首先, 考虑电采暖用户舒适性、经济性及公平性目标, 通过改进多目标粒子群算法(IMOPSO)确定最优基准档位。然后, 建立综合加权指标与档位差值对应关系, 确定电采暖多功率级最优档位差值。最后, 以设备状态与负荷转移量为约束, 实现电采暖设备多功率级控制。算例仿真结果表明, 所提策略相比于传统控制方法可进一步实现新能源精准消纳, 在提高负荷柔性的基础上提升用户采暖舒适度, 为电采暖集群新能源消纳控制策略提供新的可行性方法。

关键词: 电采暖; 新能源消纳; 集群控制; 多功率级; 舒适度

Multi-power level control strategy of an electric heating cluster considering new energy consumption

YANG Yulong¹, WANG Tiantian¹, CHEN Xiang², JIN Rong¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China;

2. Fuyang Power Supply Company, State Grid Anhui Provincial Electric Power Co., Ltd., Fuyang 236000, China)

Abstract: At present, as a potential effective way of absorbing new energy, electric heating equipment has the problems of low source-load matching and insufficient tap position optimization. Thus a multi-power level control strategy based on a cluster control architecture of electric heating equipment is proposed. First, considering the objectives of user comfort, economy and fairness of electric heating, the optimal benchmark gear is determined by an improved multi-objective particle swarm optimization (IMOPSO) algorithm. Then, a corresponding relationship between comprehensive weighted index and gear difference is established to determine the optimal multi-power grade gear difference. Finally, multi-power level control of electric heating equipment is realized by constraining the equipment state and load transfer amount. The simulation results show that compared with the traditional control method, the proposed strategy can further realize the accurate absorption of new energy, improve user heating comfort level on the basis of improving load flexibility, and provide a new feasible method for the new energy absorption control strategy.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51907020).

Key words: electronic heating; new energy accommodation; cluster control; multi-power level; comfort

0 引言

气候变化是人类面临的全球性问题, 随着各国二氧化碳排放猛增, 对生态系统形成威胁。在这一背景下, 世界各国以全球协约的方式减排温室气体, 我国由此提出碳达峰和碳中和目标^[1-4]。我国“三北地区”传统的供暖方式为集中式“热电厂-热力管

道-用户”供暖, 该方式会对环境造成一定的影响, 尤其冬季污染现象较为严重。近年来所推广的“煤改电”措施是解决“三北地区”冬季供暖问题的有效途径, 但电采暖集群存在新能源消纳匹配性差、控制性低等问题^[5-8]。

目前, 国内外学者针对电采暖设备新能源消纳^[9-11]及控制策略问题进行了较多研究, 文献[12]以光伏和蓄热式电采暖全寿命周期投资运营成本最小为目标建立优化配置模型, 制定了互动模式下光伏与电采暖容量的优化配置策略。文献[13]基于深

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51907020); 国家电网有限公司2021年总部科技项目资助(5500-202199270A-0-00)

度强化学习方法, 解决分布式电采暖参与需求响应优化调度问题。文献[14]在电采暖设备等热参数模型上引入温度不确定性指标, 制定了分散式电采暖负荷协同优化策略。文献[15]通过定义温度延伸裕度作为温控设备排序指标及温度设定值调节量, 在提高风电消纳的基础上, 维持了较好的用户采暖舒适度。文献[16]提出了一种考虑停电时段用户最小热需求的电采暖日前优化调度方法, 以采暖舒适度及经济性为目标、以最小用热量为约束建立优化调度模型, 实现了“停电不停热”的目标, 并且提升了用户供暖经济性及可靠性。

现有研究主要通过对电采暖设备的精细化建模、负荷预测及设备温度进行控制, 以提高设备新能源出力曲线匹配度, 研究过程中存在电采暖设备设定功率恒定的问题, 该设定降低了分布式电采暖的新能源消纳潜力, 同时未考虑注入功率对采暖用户舒适度、经济性及采暖设备的公平性问题。

针对以上问题, 本文提出考虑新能源消纳的电采暖集群多功率级控制策略。首先制定电采暖设备集群控制框架, 建立电采暖设备二阶电热模型。在此基础上, 提出电采暖集群多功率级控制策略, 通过设备启停状态及档位变换相组合的方式, 实现电采暖设备的合理控制。对于档位确定问题, 综合考虑采暖用户经济性、舒适性及设备开关公平性, 引入非支配排序策略及精英保留策略改进多目标粒子群算法(Improved Multi-objective Particle Swarm Optimization, IMOPSO), 通过 IMOPSO 算法确定电采暖设备最优功率级档位, 进一步建立综合加权指标与档位差值对应关系, 确定合理档位差值, 实现电采暖集群多功率级控制过程中的档位选择。

1 电采暖设备集群控制框架

考虑到电采暖设备与传统集中供热系统的区别, 为实现电采暖设备的集中控制及新能源的有效消纳问题, 负荷聚合商(Load Aggregator, LA)逐渐成为电采暖负荷需求侧响应主体, 在聚合一定量电力用户之后, 作为新的主体参与需求响应市场, 相较于传统模式, 负荷聚合商模式具备市场效率较高、专业性较好等优点, 因此已经成为目前的发展趋势^[17-20]。现阶段, 负荷聚合商主要包含紧急型及经济型两种模式, 考虑到电采暖负荷的特殊性与物理分布特性, 结合电采暖设备集群负荷特性, 本文提出以负荷聚合商为需求侧响应主体的控制架构, 根据用户所在智能小区地理差异划分区域, 将区域内接受调控的用户进行集群, 通过负荷聚合商和楼宇级控制单元实现集群控制。本文提出的控制架构如图 1 所示。

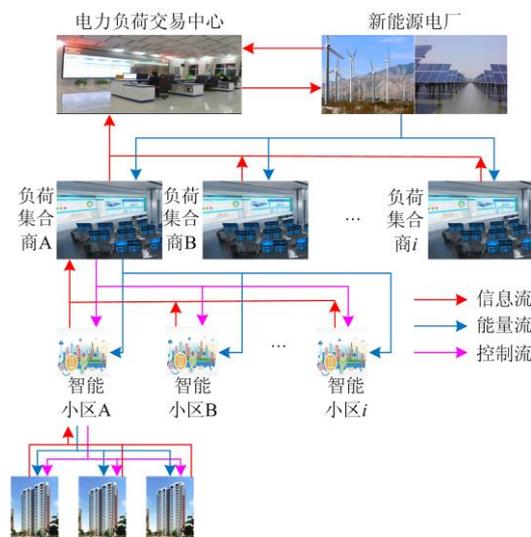


图 1 电采暖集群控制架构

Fig. 1 Electric heating cluster control architecture

1) 负荷聚合商作为本控制架构的主体, 通过对智能小区内各用户电采暖负荷进行数据采集、评估、预测, 并作为电力市场购电方参与市场电力竞价, 以满足各小区采暖负荷的需求及部分新能源消纳。

2) 各 LA 获得所需采暖负荷后, 根据楼宇能量管理系统上传的用能诉求及新能源消纳指标进行电采暖设备运行状态控制, 将控制指令下发给各楼宇级控制单元。

3) 位于小区内的每栋楼配置一个控制装置, 该控制器不仅可以采集楼内所有用户的实时室温、电采暖运行状态, 向电采暖设备下发控制指令以改变其运行状态, 还可以将楼内采暖负荷汇总后上传至智能小区负荷管理中心, 进行数据处理及存储, 并进一步将信息上传给 LA。

4) 各电采暖用户家中均装有温度量测传感器和远程控制开关, 收集用户的实时室温和设备运行状态后上传给对应的控制单元, 同时接受智能小区负荷控制中心下发的调整运行状态的指令, 从而完成设备控制及新能源消纳任务。

2 分布式电采暖设备电热模型

由电采暖集群控制架构可以看出, 负荷聚合商与用户侧之间存在负荷数据收集、设备控制命令下发的联系。为提高负荷聚合商经济性, 需制定合理的控制策略实现新能源的消纳, 并且应尽量降低电采暖设备的故障率^[21-22]。因此, 需对电采暖设备的运行特性及负荷特性进行正确分析, 以实现电采暖设备的合理控制。

分布式电采暖设备包含直热式及蓄热式两类,

本文主要针对电直热设备进行分析。由于电直热设备采暖情况受到房屋结构及环境温度影响，因此分布式电采暖运行过程中的电热场变换特性常采用能量守恒原理建立其热-电特性。考虑到电采暖设备复合传热过程，常采用准确度较高、计算速度较快的二阶热力学模型^[23-24]。图2所示为分布式电采暖二阶等效热力学模型。

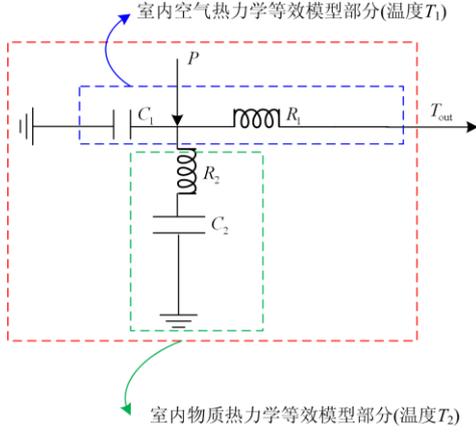


图2 分布式电采暖设备二阶等效模型

Fig. 2 Second-order equivalent model of distributed electric heating equipment

图2所示分布式电采暖设备二阶等效模型包含空气及环境物质两部分，对应温度分别为 T_1 、 T_2 ，室外温度为 T_{out} 。对分布式电采暖单元模型而言，其空间状态方程为

$$\begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{(R_1 + R_2)}{R_1 R_2 C_1} & \frac{1}{R_2 C_1} \\ \frac{1}{R_2 C_2} & -\frac{1}{R_2 C_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_{out} + R_1 P}{R_1 C_1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中： C_1 、 C_2 分别为室内空气及物质热容； R_1 、 R_2 分别为室内空气及物质热阻； P 为分布式电采暖设备功率。

在一定的环境温度范围内，考虑到测量过程中分布式电采暖设备的启停时间，可以进一步简化分布式电采暖单元模型，设备启停过程中，室内温度 T_{room} 变化可由式(2)计算。

$$T_{room}^{i+1} = \begin{cases} T_{out}^{i+1} + PR - (T_{out}^{i+1} + PR - T_{room}^i) e^{-\Delta t / RC} & S^i = 1 \\ T_{out}^{i+1} - (T_{out}^{i+1} - T_{room}^i) e^{-\Delta t / RC} & S^i = 0 \end{cases} \quad (2)$$

式中： T_{out} 表示室外温度； i 表示步长； S^i 表示电采暖设备的开关状态，可由式(3)计算。

$$S^i = \begin{cases} 1 & T_{room}^{i-1} < T_{low} = T_{set} - \delta / 2 \\ 0 & T_{room}^{i-1} < T_{high} = T_{set} + \delta / 2 \\ S^{i-1} & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中： T_{set} 为电采暖设备的设定温度值； δ 为温度死区宽度； T_{low} 为设定的温度下限； T_{high} 为设定的温度上限。

图3为单台电采暖设备开关状态图。设定温度区间为 $[T_{min}, T_{max}]$ ，电采暖设备开启后，室内温度逐渐升高，当室温 T_{room} 升高至温度上限 T_{max} 时，电采暖设备由开启转变为关闭，受到热辐射及热交换影响，室内温度逐渐下降；当室温 T_{room} 降低至温度下限 T_{min} 时，电采暖设备由关闭转变为开启，以此循环往复。

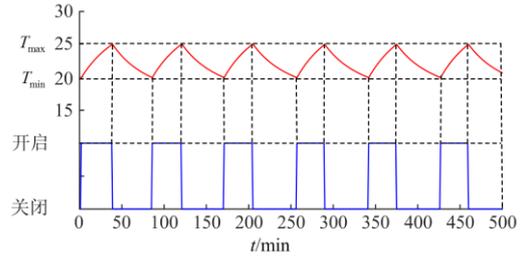


图3 单台电采暖设备运行状态

Fig. 3 Operation status of a single electric heating device

3 电采暖设备多级控制策略

负荷聚合商在实现小区级负荷的分析与评估后，需制定合理的电采暖设备控制策略，完成新能源的消纳任务。传统的控制策略受到早期设备的约束，其注入功率为定值，但随着目前电采暖设备的发展，变功率、变频设备增多，出现电采暖设备多档位控制，但目前多档位控制策略不完善，档位制定模糊。因此本文综合考虑用户采暖舒适度、经济性及设备开关公平性，确定电采暖设备最优基准档位及合理档位差值，在此基础上细化电采暖集群多级功率控制策略。

3.1 基于改进多目标粒子群算法的最优基准档位确定

3.1.1 改进多目标粒子群算法

多目标优化问题为在设定的多目标下的求解问题，一般而言，多目标优化问题包含 n 个决策变量及 m 个目标函数，可表示为

$$\begin{aligned} \min / \max \mathbf{Y} &= f(\mathbf{X}) = (f_1(\mathbf{X}), f_2(\mathbf{X}), \dots, f_m(\mathbf{X})) \\ \text{s.t. } &g_k(\mathbf{X}) \leq 0, \quad k = 1, 2, \dots, P \\ &h_j(\mathbf{X}) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, Q \end{aligned} \quad (4)$$

式中： $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为 n 个决策变量； $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_m)$ 为 m 个目标函数向量； $g_k(\mathbf{X})$ 、 $h_j(\mathbf{X})$ 分别为需要满足的 P 、 Q 个不等式约束及等式约束。

传统的粒子群算法在迭代计算过程中通过不

断搜索, 寻找个体适应度最好的位置(Personal Best, Pbest)以及表征当前种群全局适应度最好的位置(Global Best, Gbest), 在此基础上进行粒子速度及位置的更新, 从而确定空间中的最优解。假设针对 a 维空间中存在的 A 个粒子的种群进行最优搜索, 则进行 b 次迭代时, 种群中第 c 个粒子所对应的位置 L_c^b 及速度 V_c^b 解向量分别为

$$\begin{cases} L_c^b = (x_{c1}^b, \dots, x_{cj}^b, \dots, x_{cd}^b) \\ V_c^b = (v_{c1}^b, \dots, v_{cj}^b, \dots, v_{cd}^b) \end{cases} \quad (5)$$

式中, $1 \leq j \leq d$, $1 \leq c \leq A$ 。

当第 b 次迭代结束后, 其对应的个体最优位置 Pbest 与全局最优位置 Gbest 分别为

$$\begin{cases} P_c^b = (p_{c1}^b, \dots, p_{cj}^b, \dots, p_{cd}^b) \\ G_e^b = (g_{e1}^b, \dots, g_{ej}^b, \dots, g_{ed}^b) \end{cases} \quad (6)$$

其中, 第 c 个粒子迭代计算过程中速度及位置的更新过程可通过式(7)、式(8)进行计算。

$$v_{cj}^{b+1} = wv_{cj}^b + r_1s_1(p_{cj}^b - x_{cj}^b) + r_2s_2(g_{ej}^b - x_{cj}^b) \quad (7)$$

$$x_{cj}^{b+1} = x_{cj}^b + v_{cj}^{b+1} \quad (8)$$

式中: r_1 、 r_2 为加速因子, 其决定粒子群算法中个体经验和群体经验对粒子运动的影响; s_1 、 s_2 为两个 0 到 1 之间的随机数; w 为惯性权值, 表征个体在更新速度时对原有速度的保持程度。

传统的多目标粒子群算法常通过目标线性加权或模糊隶属度方法将多目标转化为单目标问题进行最优解确定, 但电采暖设备多档位最优功率级的确定过程为复杂的非线性多目标优化问题, 采用传统的处理方法存在一定问题, 因此本文结合累积非支配排序策略、拥挤度距离计算策略优化全局最优解的选取, 结合精英保留策略提高算法寻优速度, 实现多目标下电采暖设备多功率级最优档位的确定。IMOPSO 算法的基本流程如图 4 所示。

得到最优 Pareto 解集后, 采用加权方法确定最优基准功率 P_{OP} , 其中, 舒适度、经济性、公平性的权重分别为 0.4、0.4、0.2, 定义综合指标为

$$S = 0.4u_1 + 0.4u_2 + 0.2u_3 \quad (9)$$

式中: S 为综合指标; u_1 、 u_2 、 u_3 分别为舒适度、经济性、公平性分项指标。 u 可通过式(10)进行计算。

$$u = \sqrt{\frac{f_{\max} - f(X)}{f_{\max} - f_{\min}}} \quad (10)$$

式中, f_{\max} 、 f_{\min} 分别为非劣解集中所对应目标函数的最大、最小值。

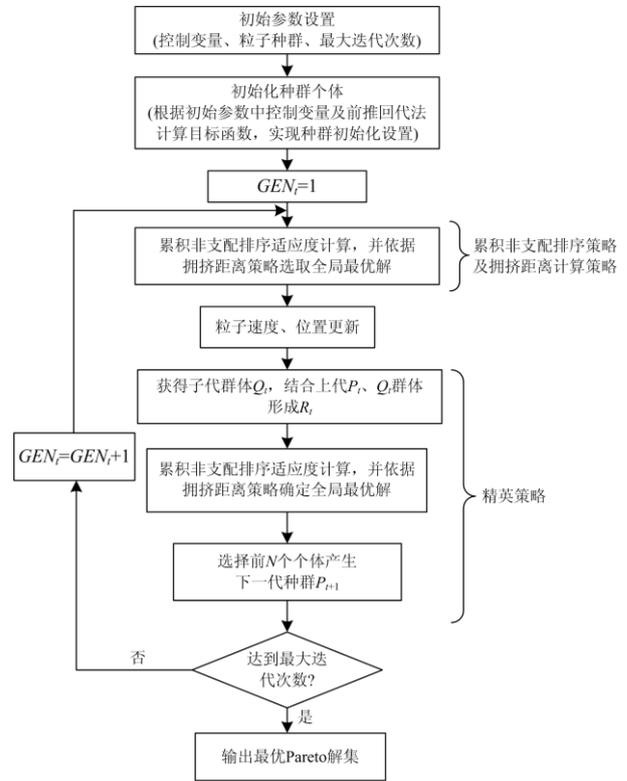


图 4 IMOPSO 流程图

Fig. 4 IMOPSO flowchart

3.1.2 电采暖设备约束条件

针对电采暖设备运行特性建立相应约束条件。

1) 分布式电采暖设备电-热特性数学模型

$$\begin{cases} P_{hp,t} = Q_{hp,t} / COP_t \\ COP_t = f(Q_{hp,t} / Q_{hp-rate}) \end{cases} \quad (11)$$

式中: COP_t 为对应时段分布式电采暖设备能耗比, 可根据具体设备进行确定; $Q_{hp,t}$ 、 $Q_{hp-rate}$ 分别为分布式电采暖设备额定功率及额定制热功率。

2) 运行功率约束

$$0.5P_{hp-rate} \leq P_{hp,t} \leq 1.5P_{hp-rate} \quad (12)$$

式中, $P_{hp-rate}$ 为分布式电采暖设备额定输出电功率。

3.1.3 控制目标确定

1) 群体舒适性

电采暖设备工作时能够提高室内温度, 从而为用户提供舒适的采暖环境, 因此, 用户采暖满意度是评价电采暖效果的重要指标。目前, 广泛采用的人体舒适度评价方法为基于预测平均投票数(Predicted Mean Vote, PMV)指标的方法。PMV指数是一种从统计学角度定义的人体舒适度评价指标^[15,25-27], 能够根据人体热平衡预计群体对环境温度的满意程度, 取值区间为[-3, +3], 分别对应热、暖、稍暖、适中、

稍凉、凉、冷7种热感觉。由于传统PMV计算涉及较多统计参数,计算过程复杂,对于采暖舒适度,不同人群、年龄段有不同的舒适度,而本文通过电采暖设备集群多功率级控制实现新能源的消纳,需构建更适合集群控制的群体舒适度函数,满足大规模集群快速计算、高速响应电网的调度需求,因此采用简化PMV指数,以表征群体采暖舒适度,其形式为

$$I_{PMV} = aT_a + bP_v - c \quad (13)$$

式中: T_a 为室内温度; P_v 为相对湿度,由于北方冬季室内湿度变化较小,本文设置 P_v 为 30%。

将电采暖用户按照年龄段和活动强度进行分类,并基于全局温度的控制方式设定群体最优舒适温度。根据文献[28]对不同年龄个体进行的问卷调查,确定 I_{PMV} 与多参数的函数关系,在此基础上采用三次样条插值拟合 I_{PMV} 与 T_a 、 P_v 的函数关系,得到模型参数 a 、 b 、 c 分别为 0.18、0.03、4.05,则式(13)可表示为

$$I_{PMV} = 0.18 \times T_a + 0.03 \times P_v - 4.05 = 0.18 \times T_a - 4.04 \quad (14)$$

由式(14)得到 PMV 与室温的关系如图 5 所示。

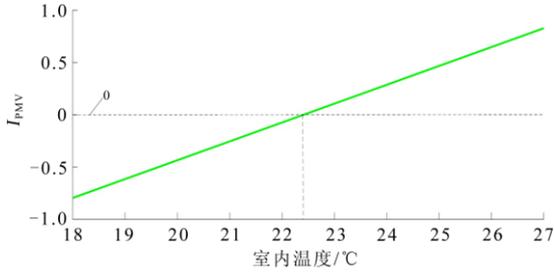


图 5 供暖季节不同室温下的 PMV

Fig. 5 PMV at different room temperatures in heating season

ISO7730 规定对应 PMV 指数在 ± 0.5 范围内可认定为满足 90% 以上用户的采暖舒适度要求。根据此项标准,结合图 5 可知, $I_{PMV} = 0$ 对应的最舒适温度约为 22 °C。因此,全局温度设定值 T_{set} 设为 22 °C,温度死区设为 [19 °C, 25 °C]。

在此基础上,建立群体采暖舒适度指标。

$$\eta = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N t_i, (t_i = \text{sum}(t \in [0.9T_{PMV,i}, 1.1T_{PMV,i}])) \quad (15)$$

式中: N 为参与需求响应的设备总数; $T_{PMV,i}$ 为第 i 个房间最优温度设定值。

2) 设备开关公平性

传统的电采暖设备运行过程中受到温度及运行条件影响,导致部分电采暖设备产生过调控与欠调控问题,设备频繁开启将严重缩减电采暖设备使用寿命。因此需针对电采暖设备开关公平性问题建立

相应目标,实现电采暖设备启停次数的一致性,其公平性目标为

$$\zeta = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N (K_i - K')^2} \quad (16)$$

式中: K_i 为设备 1 h 内开启次数; K' 为设备开启次数均值。

3) 采暖经济性

考虑分时电价影响,定义采暖经济性目标为

$$\xi = P_{i,set} \sum_{i=1}^N K_i \int_i G_t dt \quad (17)$$

式中, G_t 为分时电价。可以看出,电采暖设备经济性与设备设定功率、开启次数及分时电价相关,而分时电价由电力市场决定,无法进行调控,设备开启次数与设备功率及实时室内温度相关,因此若实现经济性最优,则需对电采暖设备功率进行控制。

3.2 档位差值确定

在确定电采暖设备最优基准功率档位后,以最优基准档位为基准值,设置档位差值为

$$P_{D-value} = (1 \pm 10\%i)P_{OP} \quad (18)$$

计算对应 $P_{D-value}$ 各指标结果及综合指标结果,在此基础上拟合档位差值与综合指标结果,建立 $S = f(P_{D-value})$ 的对应函数。由于最优基准档位功率为综合指标最优情况下的功率,因此,档位变化时会导致综合指标下降,为防止变档过程中档位变化所引起的综合指标较明显的变化,限制档位变化如式(19)。

$$\begin{cases} P_I = P_{OP} - P_{D-value,I}, & S_I = 80\% S_{max} \\ P_{II} = P_{OP}, & S_{II} = S_{max} \\ P_{III} = P_{OP} + P_{D-value,I}, & S_{III} = 80\% S_{max} \end{cases} \quad (19)$$

3.3 电采暖设备负荷转移量确定及变档操作

3.3.1 电采暖设备集群状态分组

根据温度梯度排序方法将电采暖设备分为开启群及关闭群两类,其数目可表示为

$$s = \begin{cases} k, & S^i = 1 \\ l, & S^i = 0 \end{cases} \quad (20)$$

式中, k 、 l 分别表示开启群及关闭群数目。

3.3.2 负荷转移量

本文以电采暖聚合功率与风光出力差值作为负荷转移量,可表示为

$$\Delta P(t) = P_{EHE,B}(t) - P_{WP,P}(t) \quad (21)$$

式中, $P_{EHE,B}(t)$ 、 $P_{WP,P}(t)$ 分别表示 t 时刻电采暖设备基准聚合功率及风光出力。图 6 为多功率级调控的基本策略原理。图中 I、II、III 分别对应低功率档、基准档、高功率档。

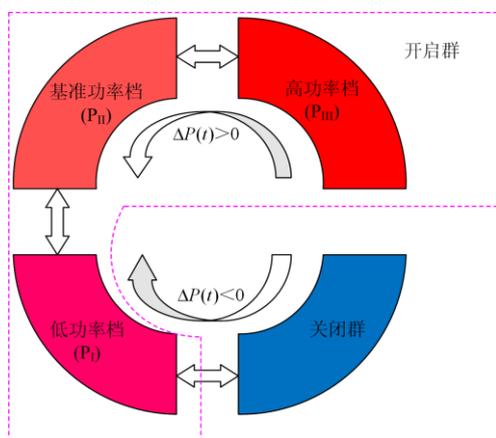


图 6 多功率级控制策略图示

Fig. 6 Diagram of multiple power level control strategy

3.3.3 升档操作

当 $\Delta P(t) < 0$ 时, 表示 t 时刻电采暖设备基准聚合功率(II 档功率)小于风光出力, 此时需对电采暖设备进行升档操作, 提高电采暖设备聚合功率, 此时无法控制开启群内高功率档运行设备, 因此需确定开启群内基准档及低功率档运行设备数目 M , 将 $\Delta P(t)$ 等比例分配至 M 台设备, 将 M 台设备分别进行升档操作(档位依次升高后进行负荷消纳验证, 若仅升高一档仍无法满足, 则进一步升档), 若升档操作完毕后仍无法消纳 $\Delta P(t)$, 则将剩余消纳任务通过关闭群设备的开启进行消纳。

3.3.4 降档操作

当 $\Delta P(t) > 0$ 时, 表示 t 时刻电采暖设备基准聚合功率大于风光出力, 此时需对电采暖设备进行降档操作, 降低电采暖设备聚合功率。首先将开启群内 III 档运行设备进行降档操作, 若 III 档降档操作完成后 $\Delta P(t)$ 仍大于 0, 则将开启群中基准档位设备调整至低功率档, 并判断是否将开启群中低功率设备关闭。

3.4 电采暖设备多功率级控制基本流程

设备安装前由设备制造商进行多功率级档位确定, 在此基础上电采暖负荷聚合商结合实时消纳任务进行电采暖设备控制, 其基本控制流程如图 7 所示。

电采暖设备多功率级控制策略基本流程如下。

- 1) 负荷聚合商确定小区内电采暖设备负荷, 并根据温度队列确定电采暖设备开启群、关闭群。在此基础上进一步确定初始状态下电采暖设备开启群档位。
- 2) 判断风光出力及电采暖设备初始聚合功率大小, 确定电采暖设备升档及降档操作。
- 3) 判断仅进行升档、降档操作能否完成风光消纳任务。

4) 若仅进行升档操作无法满足任务要求, 则将关闭群部分设备开启; 若仅进行降档操作无法满足任务要求, 则将开启群部分设备关闭(开启与关闭数目为仅进行升、降档操作无法满足的任务量的等比分配)。

5) 判断是否满足控制时间, 若满足控制时间则控制过程结束, 若不满足则进行状态更新, 进行下一轮控制。

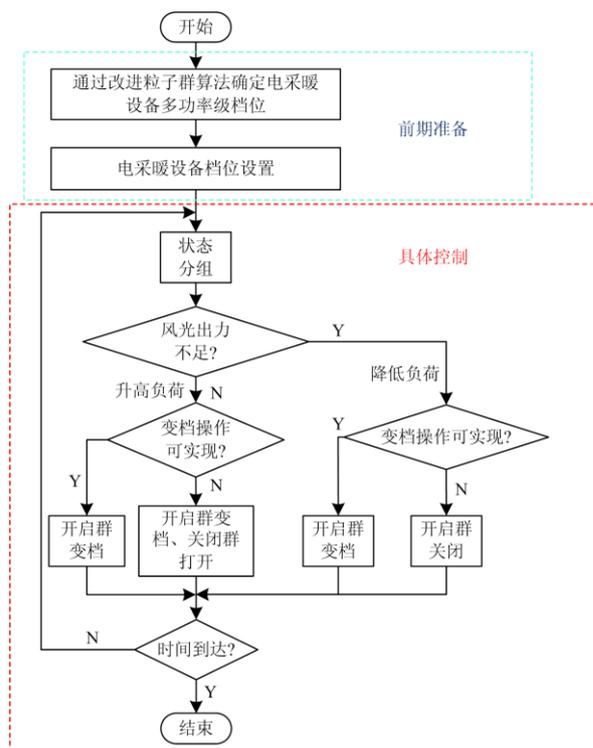


图 7 电采暖设备分级控制策略

Fig. 7 Graded control strategy for electric heating equipment

负荷聚合商层面, 需提前与电网运行商签订合同, 以负荷聚合商所服务的智能小区内的消纳能力为基准确定消纳量, 当负荷聚合商收到电网运营商下达的消纳任务后, 通过电采暖设备上传数据, 确定设备运行状态(开启/关闭、档位)按照上述控制策略流程向电采暖设备下达控制指令, 实现负荷聚合商层面的电采暖设备控制。

4 算例仿真与分析

4.1 仿真参数设置

本文选取长春市某高层电采暖小区住宅楼, 测量采集多场景、全时段的运行数据, 包括室内温度、室外温度、电采暖开关状态及电采暖设备功率等实测数据, 确定房屋热力学参数。该小区可运行分布式电采暖设备共 200 台, 典型层平面结构如图 9 所

示。依据房屋热力学参数将所有房间分为 4 种典型房间。每个房间均安装有高精度温度记录仪用来监控记录室温，分辨度为 0.1 °C，记录间隔为 5 min。电采暖设备功率如表 1 所示。

吉林省冬季典型日风光出力曲线如图 8 所示^[29]，综合考虑风光出力特性，本文以风力发电为新能源发电类型。

分别设置传统控制、等差分档控制、寻优分档控制策略下的三种场景进行算例仿真及对比分析，三种场景设置如下。

场景 1：功率档位固定，设备仅包含开、关两种情况，消纳任务通过控制设备开关状态实现。

场景 2：分级控制策略 I，消纳任务通过电采暖设备的档位及开启、关闭群数目完成，档位设置为

等差设置，等差值为 100 W，设置情况见表 1。

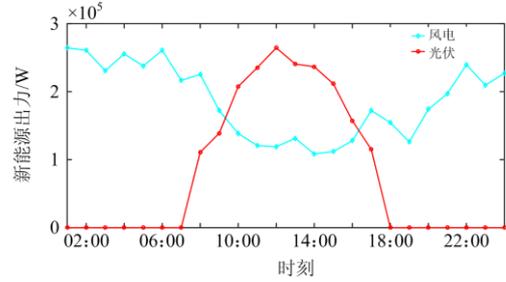


图 8 冬季典型日风光出力曲线

Fig. 8 Winter typical PV wind output curve

场景 3：分级控制策略 II，消纳任务通过电采暖设备的档位及开启、关闭群数目完成，档位设置通过本文算法进行确定。

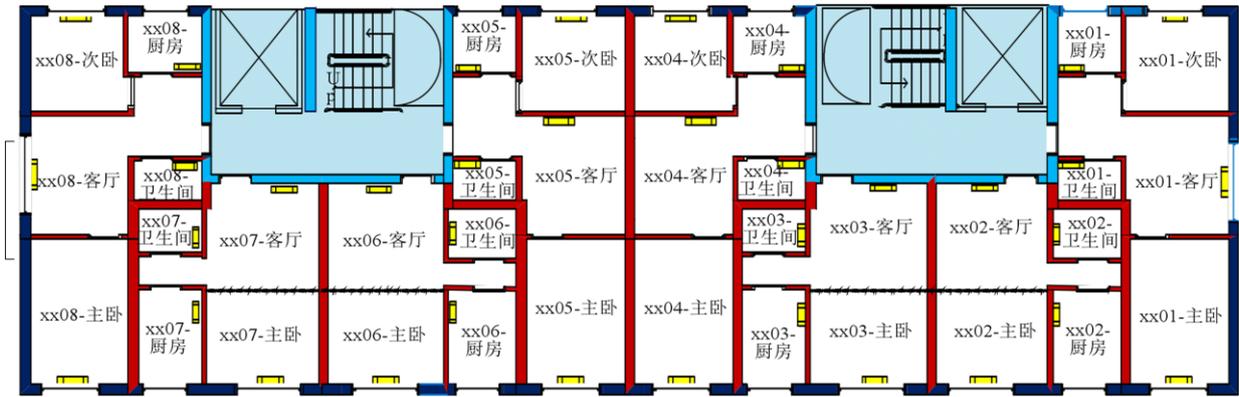


图 9 楼层平面示意图

Fig. 9 Schematic housing structure

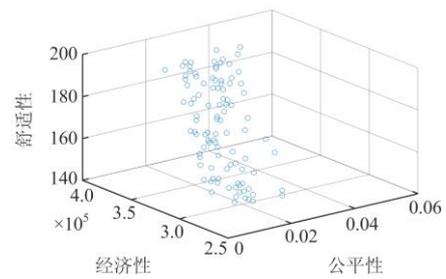
表 1 典型房间设备额定功率

Table 1 Rated power of typical room equipment

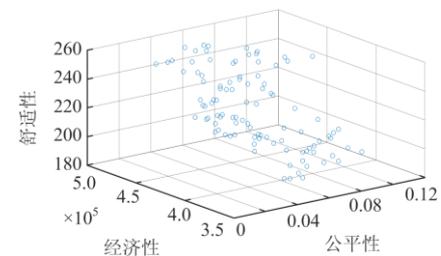
典型房间类别	I 类	II 类	III 类	IV 类
设备额定功率/kW	1.4	1.6	1.9	1.6
R_1 /(°C/W)	0.004	0.003	0.004	0.004
R_2 /(°C/W)	0.076	0.075	0.05	0.04
C_1 /(10 ⁵ J/C)	1.9	3.3	2.4	2.0
C_2 /(10 ⁵ J/C)	149.9	257.6	181.6	289.1
场景 II 分档功率	1.3/1.4/1.5	1.5/1.6/1.7	1.8/1.9/2.0	1.5/1.6/1.7

4.2 最优基准功率及功率级确定

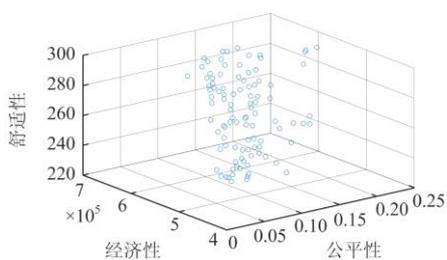
依据本文算法确定最优基准档位及各档位功率，各类型房间最优功率级 Pareto 解集结果如图 10 所示。



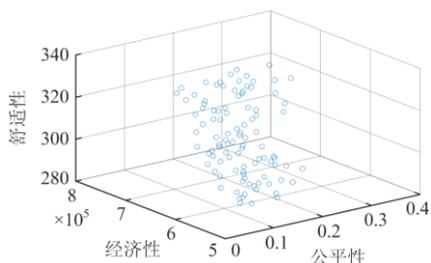
(a) 第 I 类房间



(b) 第 II 类房间



(c) 第 III 类房间

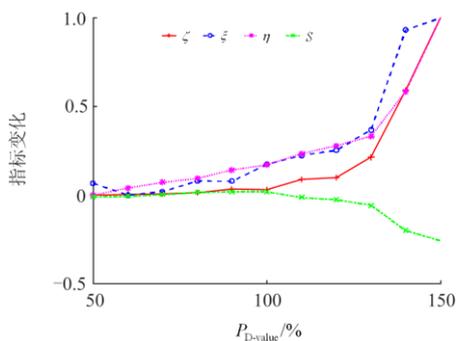


(d) 第 IV 类房间

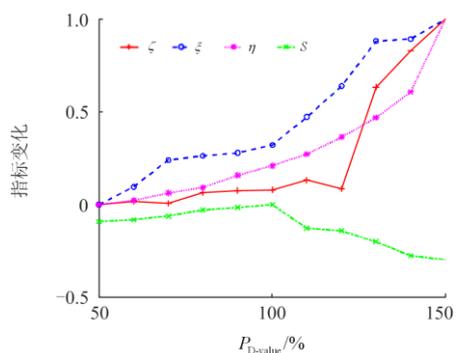
图 10 电采暖设备档位寻优结果

Fig. 10 Result of setting optimization for electric heating equipment

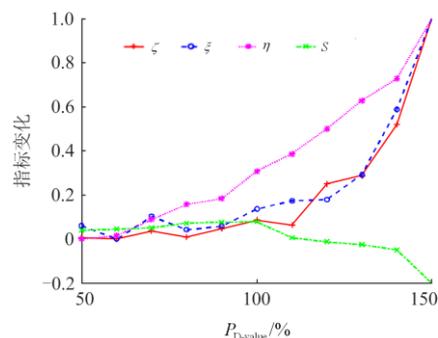
基于最优档位多目标 Pareto 解集结果, 通过加权模糊隶属度确定各类型房间最优档位分别为 1 500 W、1 725 W、2 500 W、1 600 W。以最优基准功率为基础, 进一步得到各类型房间档位功率与各项指标之间的对应关系如图 11 所示。



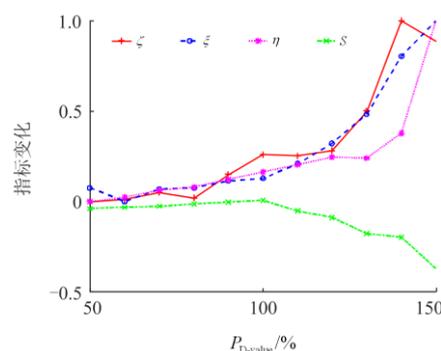
(a) 第 I 类房间



(b) 第 II 类房间



(c) 第 III 类房间



(d) 第 IV 类房间

图 11 档位功率与各指标对应关系图

Fig. 11 Diagram of gear power corresponding to each index

在此基础上拟合 S 与 $P_{D-value}$ 的对应关系为

$$S = aP_{D-value}^3 + bP_{D-value}^2 + cP_{D-value} + d \quad (22)$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 为拟合参数。

结合式(16)及分档约束条件得到各类型设备档位划分情况如表 2 所示。

表 2 电采暖设备档位设置情况

Table 2 Electric heating equipment setting

类型	I 档/W	II 档/W	III 档/W
I 类	1 050	1 500	1 650
II 类	1 205	1 725	1 900
III 类	1 435	2 050	2 255
IV 类	1 120	1 600	1 760

4.3 仿真结果分析

4.3.1 消纳情况分析

图 12 为三种场景下的电采暖设备集群风电消纳情况。

由图12可以看出, 虽然三种控制策略场景下的电采暖负荷均呈现与风电出力曲线规律相似的情况, 但对比三种场景的负荷曲线及负荷消纳量差值可以看出, 场景II、III分档控制策略下消纳情况相较于场景I固定档位控制策略较好, 且对比场景II、III可以看出, 场景III的风电出力匹配情况最优, 能

够全程跟随风电出力曲线。分析其主要原因，本文控制策略优化了基准档位及档位差值，相比于场景I控制策略而言，可通过多档位的潜在消纳能力处理消纳目标，避免电采暖集群功率快速到达高功率级，负荷柔性更好；相比于场景II控制策略而言，优化基准档位及档位差值后，设备各档位功率均为最优功率，对档位等差设置而言具备更好的消纳能力。

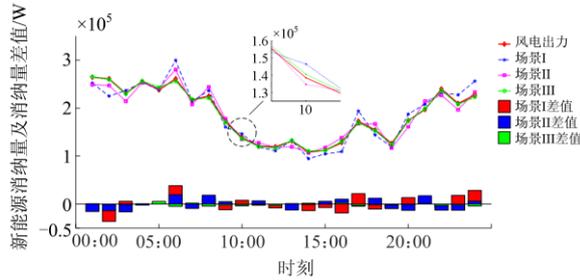


图 12 不同场景风电消纳结果

Fig. 12 Wind power dissipation nodes in different scenes

4.3.2 设备换档情况及设备开启数目

图 13 对比了三种场景下电采暖设备的开启情况及档位变换情况。

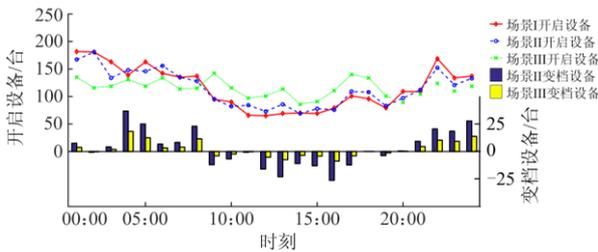


图 13 不同场景下电采暖设备开启数及变档台数

Fig. 13 Number of electrical heating devices on and off shifters in different scenarios

由图 13 可以看出，三种场景下的设备开启数目呈现中午时段低，早晨及夜间开启数目多的情况，与风电出力规律基本一致。进一步对比三种场景下的设备开启数可以看出，中午时段场景 III 设备开启数高于场景 I、II，夜间设备开启数低于场景 I、II，且场景 III 设备开启数目一天内波动较小，结合表 1、表 2 设备各档位功率可以看出，设备最低档位功率 P_{min} 关系为 $P_{min,I}(\text{设备开启功率}) > P_{min,II} > P_{min,III}$ ，中午时段风电出力较低，相同的风电出力情况下，功率较小的设备仍能维持开启情况，但开启功率较大的设备为了应对较低的风电出力只能进行关闭。结合图 12 各场景消纳差值也可看出，中午时段场景 III 消纳差明显小于场景 I、II。对比场景 II、III 变档数目可以看出，场景 III 变档设备数目明显低于场景 II，说明本文所提方法负荷消纳潜力较大，设备

变动情况较少，有利于提高设备使用寿命。

4.3.3 室内温度及舒适度

进一步对比不同场景下室内温度及群体舒适度，仿真结果如图 14 所示。

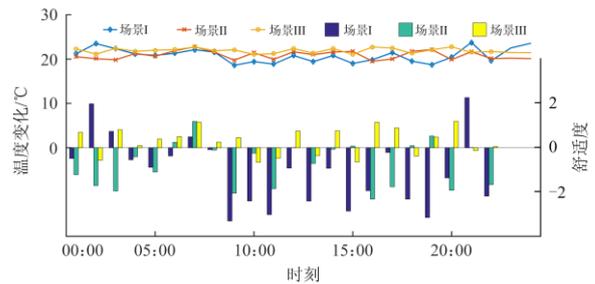


图 14 室内温度及群体舒适度结果

Fig. 14 Indoor temperature and group comfort results

由图 14 可以看出，场景 III 温度波动相比于场景 I、II 而言更小，且场景 III 温度基本维持在 22℃，与群体最适温度一致。对比人体舒适度结果可以看出，场景 III 人体舒适度较高，较冷体感情况少，而场景 I、II 较冷体感多，人体舒适度为受到室内温度波动影响，而场景 III 温度波动小，且基准功率较高（基准功率档位运行时间长于其他档位），因此场景 III 人体舒适度高，较冷体感出现少。

5 结论

本文基于电采暖集群控制框架，考虑采暖舒适性、经济性及设备开关公平性，建立电采暖设备多功率级控制策略，在实现新能源精准消纳与提高负荷柔性的基础上，提升电采暖集群用户的舒适性，主要结论如下。

1) 以用户采暖舒适性、经济性及设备开关公平性为目标，采用 IMOPSO 算法实现了最优基准功率档位的确定，得到综合指标与档位差值的对应关系，在此基础上确定了最优档位设置情况，为电采暖设备分档控制奠定基础。

2) 本文策略根据新能源出力变化情况，优先通过设备档位调节的方式提高源荷匹配性，避免了设备启停数目快速变换的问题。

3) 多功率级档位的控制策略，通过调节设备档位及变换启停状态相结合的方式，提高了电采暖设备集群对新能源出力的柔性响应速度与风电消纳能力，为新能源的利用与推广提供新的可行性方案。

参考文献

[1] 白浩, 袁智勇, 周长城, 等. 计及新能源波动与相关性的配电网最大供电能力调度方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(8): 66-73.

- BAI Hao, YUAN Zhiyong, ZHOU Changcheng, et al. Distribution network maximum power capacity dispatch method taking into account the fluctuation and correlation of new energy[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(8): 66-73.
- [2] 张彼德, 陈颖倩, 李孟洁, 等. 含热泵和相变储能的多能互补微能源网运行优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 106-114.
- ZHANG Bide, CHEN Yingqian, LI Mengjie, et al. Study on optimization methods of multi-energy complementary micro-energy network with heat pump and phase change storage[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 106-114.
- [3] 陈厚合, 茅文玲, 张儒峰, 等. 基于碳排放流理论的电力系统源-荷协调低碳优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 1-11.
- CHEN Houhe, MAO Wenling, ZHANG Rufeng, et al. Low carbon optimal dispatch of power system based on carbon emission flow theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 1-11.
- [4] SONG Chaofan, LI Yang, RAJEH T, et al. Application and development of ground source heat pump technology in China[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(2): 215-232.
- [5] WANG Weijun, LI Fan. Study on substitutable value of electric heating instead of coal heating in northern China under carbon constraints[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260.
- [6] 全新宇, 张宇泽, 张长生, 等. 基于广义回归神经网络的有源配电网网供负荷预测方法[J]. 供用电, 2020, 37(12): 40-45.
- TONG Xinyu, ZHANG Yuze, ZHANG Changsheng, et al. Load forecasting method of active distribution network based on generalized regression neural network[J]. Distribution & Utilization, 2020, 37(12): 40-45.
- [7] 宋杰, 张卫国, 李树鹏, 等. 蓄热式电采暖负荷参与风电消纳运行策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3): 80-87.
- SONG Jie, ZHANG Weiguo, LI Shupeng, et al. Research on operational strategy for regenerative electric heating load participating in wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 80-87.
- [8] 王世君, 袁绍军, 卢志刚, 等. 基于改进 MOBCC 算法的空气源热泵水温范围设置优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 125-133.
- WANG Shijun, YUAN Shaojun, LU Zhigang, et al. Research on optimization of water temperature range setting of air source heat pump based on improved MOBCC algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 125-133.
- [9] 薛晨, 任景, 马晓伟, 等. 面向高比例新能源消纳的西北调峰辅助服务市场机制及实践[J]. 中国电力, 2021, 54(11): 19-28.
- XUE Chen, REN Jing, MA Xiaowei, et al. Mechanism of peak regulation auxiliary electricity market in the presence of high-penetration renewable energy and its practice in Northwest China[J]. Electric Power, 2021, 54(11): 19-28.
- [10] 林俐, 李北辰, 孙勇, 等. 基于高比例新能源消纳的抽水蓄能容量多时间尺度迭代优化配置模型[J]. 电网与清洁能源, 2021, 37(1): 104-111.
- LIN Li, LI Beichen, SUN Yong, et al. Multi-time-scale iterative optimal configuration model of pumped storage capacity based on accommodation of high share new energy[J]. Power System and Clean Energy, 2021, 37(1): 104-111.
- [11] 李湘旗, 禹海峰, 李欣然, 等. 考虑储能系统动态全寿命周期特性的多功能应用需求规划方法[J]. 电力建设, 2020, 41(1): 45-54.
- LI Xiangqi, YU Haifeng, LI Xinran, et al. Planning method for multi-functional application demand considering dynamic life cycle characteristics of energy storage[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(1): 45-54.
- [12] 赵铁军, 孟菁, 王珺, 等. 互动模式下光伏与电采暖蓄热容量优化配置策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2021, 33(5): 9-15.
- ZHAO Tiejun, MENG Jing, WANG Jun, et al. Optimal configuration strategy of solar and electric heating capacity under interactive mode[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2021, 33(5): 9-15.
- [13] 严干贵, 阚天洋, 杨玉龙, 等. 基于深度强化学习的分布式电采暖参与需求响应优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4140-4149.
- YAN Gangui, KAN Tianyang, YANG Yulong, et al. Distributed heating based on deep reinforcement learning participates in optimal dispatch of demand response[J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4140-4149.
- [14] 范帅, 郑琨琪, 郭炳庆, 等. 分散式电采暖负荷协同优化运行策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 20-29.
- FAN Shuai, JIA Kunqi, GUO Bingqing, et al. Collaborative optimal operation strategy for distributed heating load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 20-29.
- [15] 戚野白, 王丹, 贾宏杰, 等. 基于归一化温度延伸裕度控制策略的温控设备需求响应方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(21): 5455-5464.
- QI Yebai, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Study on

- demand response method of temperature control equipment based on normalized temperature extension margin control strategy[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(21): 5455-5464.
- [16] 张嘉睿, 穆云飞, 贾宏杰, 等. 考虑停电时段用户热需求的蓄热式电采暖日前优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(21): 15-22.
- ZHANG Jiarui, MU Yunfei, JIA Hongjie, et al. Optimal dispatch method for heat-storage electric heating days before power outage period is considered[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(21): 15-22.
- [17] PARIDARI K, NORDSTRM L. Flexibility prediction, scheduling and control of aggregated TCLs[J]. Electric Power Systems Research, 2020, 178.
- [18] RAD A S, ZANGENEH A. Optimal contract pricing of load aggregators for direct load control in smart distribution systems[J]. Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences, 2019, 27(1): 167-180.
- [19] SONG Zhaofang, SHI Jing, LI Shujian, et al. Day ahead bidding of a load aggregator considering residential consumers demand response uncertainty modeling[J]. Applied Sciences, 2020, 10(20): 7310.
- [20] WANG Zhanle, PARANJAPPE R, CHEN Zhikun, et al. A layered stochastic approach for residential demand response based on real-time pricing and incentive mechanism[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2020, 14(3): 423-431.
- [21] 李振坤, 钱晋, 符杨, 等. 基于负荷聚合商优选分级的配电网多重阻塞管理[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(19): 109-116.
- LI Zhenkun, QIAN Jin, FU Yang, et al. Distribution network multi-blocking management based on load aggregator preference rating[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(19): 109-116.
- [22] 张晶晶, 张鹏, 吴红斌, 等. 负荷聚合商参与需求响应的可靠性及风险分析[J]. 太阳能学报, 2019, 40(12): 3526-3533.
- ZHANG Jingjing, ZHANG Peng, WU Hongbin, et al. Reliability and risk analysis of load aggregator participating in demand response[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2019, 40(12): 3526-3533.
- [23] 杨玉龙, 王彤, 刘芮彤, 等. 分布式电采暖负荷群建模及备用优化[J]. 电测与仪表, 2020, 57(2): 81-87.
- YANG Yulong, WANG Tong, LIU Ruitong, et al. Modeling and backup optimization of distributed electric heating load group[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(2): 81-87.
- [24] 杨玉龙, 王彤, 穆钢, 等. 基于实测数据的分布式电采暖负荷群调峰能力评估[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 95-101.
- YANG Yulong, WANG Tong, MU Gang, et al. Assessment of peak shaving capacity of distributed heating load group based on measured data[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 95-101.
- [25] RAD H R, KHODAEI Z, GHAI M. The quantitative assessment of the effects of the morphology of urban complexes on the thermal comfort using the PMV/PPD model (a case study of Gheytariyeh neighborhood in Tehran)[J]. International Journal of Low-Carbon Technologies, 2021, 16(2): 672-682.
- [26] RUPP R F, KAZANCI O B, TOFTUM J. Investigating current trends in clothing insulation using a global thermal comfort database[J]. Energy and Buildings, 2021.
- [27] MA Nan, CHEN Liang, HU Jian, et al. Adaptive behavior and different thermal experiences of real people: a Bayesian neural network approach to thermal preference prediction and classification[J]. Building and Environment, 2021, 198(4).
- [28] 王志强, 王珊, 张馨月, 等. 计及用户响应行为差异性的区域电采暖负荷特性建模[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(7): 98-110.
- WANG Zhiqiang, WANG Shan, ZHANG Xinyue, et al. Modeling of regional electric heating load characteristics considering the difference of user response behavior[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7): 98-110.
- [29] 李春山, 任普春, 吴姜. 扎鲁特直流对吉林省风电消纳影响研究[J]. 东北电力大学学报, 2018, 38(6): 1-8.
- LI Chunshan, REN Puchun, WU Jiang. Impact of Zhalut DC on wind power absorption in Jilin Province[J]. Journal of Northeast Electric Power University, 2018, 38(6): 1-8.

收稿日期: 2021-07-09; 修回日期: 2021-11-15

作者简介:

杨玉龙(1986—), 男, 博士, 讲师, 研究方向为综合能源系统优化、风电并网消纳、需求侧管理; E-mail: yangyulong@neepu.edu.cn

王甜甜(1997—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为分布式电采暖控制策略与优化运行。E-mail: 2750128599@qq.com

(编辑 许威)